

## ***Tratamiento de la irrigación en los modelos numéricos de predicción del tiempo***

E. Rodríguez Camino, José A. Parodi Perdomo y B. Navascués Fernández-Vitorio  
Instituto Nacional de Meteorología, España, e.rodriguez@inm.es

### **SUMMARY**

*The treatment of surface processes in the current numerical weather prediction models has steadily increased its degree of complexity. In parallel, new techniques have been developed to initialise the variables introduced by the surface schemes. However, some relevant processes are still excluded from the algorithms simulating land surface in atmospheric models. Among those processes neglected by current models, the following ones can be mentioned: i) irrigation practices, so frequent over the Iberian peninsula; ii) interaction with ground water in case of shallow water table; iii) water storage in dams; iv) direct uptake of cloud water by soil and plants, etc. This contribution discusses in the frame of the Iberian Peninsula the approximate magnitude of irrigation and its importance for simulating in a realistic way surface processes in numerical weather and climate prediction. The modelling of irrigation should necessarily take into account the growing and harvesting cycles of different species, the irrigation practices and the source of water used for irrigation. The study of errors in the current surface schemes and their compensation by the soil moisture assimilation algorithms can provide some hints on the magnitude of the problem and different ways to tackle it.*

### **RESUMEN**

*El tratamiento de los procesos de superficie en los modelos numéricos de predicción del tiempo ha ido paulatinamente aumentando su grado de complejidad. En paralelo se han desarrollado técnicas para inicializar las variables introducidas por los esquemas de superficie. Sin embargo, algunos procesos muy relevantes están todavía excluidos de los algoritmos que simulan la superficie terrestre en los actuales modelos. Entre dichos procesos se pueden mencionar las prácticas de irrigación tan extendidas en la península Ibérica, la interacción con las aguas subterráneas en el caso de capas freáticas poco profundas, el almacenamiento del agua en grandes presas y su posterior utilización, la captación directa por parte del suelo y de las plantas del agua procedente de las nieblas, etc.*

*En esta contribución se discutirá en el marco de la península Ibérica la magnitud estimada de la irrigación y la importancia de su modelización para simular de forma realista los procesos de superficie en los modelos de predicción del tiempo y del clima.*

*La modelización de la irrigación deberá tener necesariamente en cuenta el ciclo vegetativo de las diferentes cosechas, las prácticas de irrigación, el origen del agua utilizada en la irrigación.*

*El estudio de los errores de los actuales esquemas de superficie y su compensación por parte de los algoritmos de asimilación de la humedad del suelo pueden suministrar algunas indicaciones de la magnitud del problema y de posibles formas de atacarlo.*

## 1. Introducción

El problema de los recursos de agua tanto a escala regional como global es un tema importante tanto desde el punto de vista científico como ambiental. Shiklomanov (1997) estima que la agricultura irrigada consume el 87% de los recursos hídricos globales y contribuye con más del 50% de la producción agrícola mundial, aunque utiliza sólo el 15% del área cultivada.

Tanto la irrigación como el drenaje son dos formas extremas de cambiar el uso de suelo que lógicamente tienen su impacto en las circulaciones de mesoscala e incluso a escala sinóptica. La irrigación y el drenaje alteran el contenido de agua del suelo que se tendría naturalmente al alcanzarse el balance entre los aportes de la precipitación y los gastos por evapotranspiración y escorrentía. A su vez una alteración sustancial de la humedad del suelo propicia un cambio de vegetación que influye en la evapotranspiración, en la escorrentía y en menor medida en la precipitación.

Para buscar los efectos de la irrigación es natural prestar atención a las grandes zonas en las que se ha introducido la irrigación en un corto lapso de tiempo. Este es el caso de las Grandes Llanuras de EE.UU. La irrigación comenzó a principio de los 1940's (con sólo 7500 km<sup>2</sup> de terreno irrigado), alcanzando en los 1980's una extensión superior a los 60000 km<sup>2</sup>. Barnston y Schickedanz (1984) mediante un análisis estadístico de la precipitación en la región de Texas Panhandle de las Grandes Llanuras encontraron un aumento del 25% en la precipitación que los autores asociaban directamente al fuerte aumento de superficie irrigada. Asimismo, se observó una reducción de las temperaturas máximas en aproximadamente 2° C. Hammer (1970) explicó, en el caso similar de Sudán, los anteriores cambios por la existencia de un embolsamiento de aire frío y húmedo sobre la zona irrigada que es origen de convergencia, elevación del aire y formación de nubes que disparan más frecuentemente procesos de precipitación. Más recientemente, Moore y Rojstaczer (2001) usaron técnicas de funciones ortogonales empíricas para estudiar los cambios de precipitación inducidos por la irrigación en la totalidad de la región de las Grandes Llanuras y sobre un periodo de tiempo mayor. Contrariamente a las conclusiones de Barnston y Schickedanz (1984), la evidencia de precipitación inducida por la irrigación es en este estudio muy pequeña, siendo algo más grande sobre la región de Texas Panhandle y sobre el periodo reducido 1950-1982.

Otro ejemplo de modificación en la precipitación como consecuencia de la irrigación lo proporcionan Lohar y Pal (1995) para el caso de la precipitación premonzónica en la India. En este caso, el estudio de 20 años de datos (1973-1992) y la simulación numérica demuestran una clara tendencia a la reducción de la precipitación durante los años más recientes. El aumento de la humedad del suelo como consecuencia del incremento de la irrigación impide el desarrollo e intensificación de la circulación mesoscalar de tipo brisa marina, reduciendo a su vez el aporte de humedad en bajos niveles, que es esencial para disparar los procesos convectivos y como consecuencia se produce una reducción en la precipitación. Este caso presenta la peculiaridad de que la irrigación afecta a la circulación mesoscalar, reduciendo como consecuencia la precipitación.

## 2. Regadío en el mundo

La extensión de la superficie regada es bastante incierta, y su estimación con frecuencia se basa en las cifras oficiales y no en las cifras reales. Este problema es más agudo en los países en los que la extracción ilegal de acuíferos subterráneos es una práctica habitual (Droogers, 2002), como es el caso de Paquistán en donde la discrepancia entre las cifras oficiales y las reales pueden variar en un 100%. También contribuye a esta incertidumbre las diferentes definiciones de irrigación (Droogers, 2002).

Hay actualmente tres bases de datos globales relativas a la irrigación:

- \* FAOSTAT. La "Food and Agriculture Organization" (FAO) tiene como parte de su mandato la recopilación de información y datos relevantes a los diferentes aspectos de la agricultura y la alimentación de todos los países (FAO, 2001) El principal problema de esta base de datos es su dependencia de las cifras oficiales y la ausencia de datos de distribución dentro de cada país.

- \* USGS Global Land Cover Map. Posee una resolución global de 1 km y se ha desarrollado para multitud de aplicaciones de modelización y de investigación (Anonymous 2001a). Se ha obtenido a partir de 12 meses de datos (desde abril 1992 a marzo 1993) con una resolución de 1km del Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Se calculó el "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) a partir de la banda roja e infrarroja próxima del AVHRR y después por métodos temporales de clasificación no supervisada se obtuvieron los diferentes usos de suelo, que incluyen diferentes tipos de terreno irrigado.

- \* Kassel Digital Global Map of Irrigated Areas. Es un mapa raster con resolución 0.5° x 0.5° (Doll and Siebert, 1999). Se incluye el porcentaje de cada cuadrado de rejilla con superficie irrigada.

La principal diferencia entre las tres bases de datos es el origen de los datos. Mientras FAO y Kassel utilizan datos suministrados por otras agencias, USGS utiliza sus propias observaciones basadas en datos de satélite. Otra gran diferencia es la resolución. Mientras FAO suministra datos al nivel de país, Kassel presenta los datos a escala de píxel pero actualizados para ajustarse con los datos FAO totales de cada país. La resolución de 1 km de USGS es mucho mayor que las otras dos bases de datos.

Los tres países más irrigados (India, China y EEUU) conjuntamente cubren más del 50% del área irrigada total. Si nos centramos solamente en los países que poseen más del 1% del área total irrigada (FAOSTAT, 1998), España es el primer país europeo que aparece en la lista con un área irrigada superior a los 36,000 km<sup>2</sup>.

## 3. Regadío en España

En el año 1999 se consumieron en España 17.681 Hm<sup>3</sup> de agua para fines de regadío (INE, 1999). En el año 1993 la superficie irrigada en España era 34,530 km<sup>2</sup> (INE), en

1998 era de 36,400 km<sup>2</sup> (FAOSTAT). Si tomamos como cifra aproximada 40,000 km<sup>2</sup>, se tiene que aproximadamente el 8% del territorio esta siendo irrigado. Esta es una cifra significativa de cara a cualquier balance hídrico. Dividiendo el agua consumida en regadío por la superficie total de la superficie irrigada, se tiene una estimación de 512 lm<sup>-2</sup> para el promedio aportado por la irrigación, suponiendo que la aportación se realiza uniformemente sobre toda la superficie. Esta estimación es comparable con la cantidad aportada por la precipitación. Las figura 1a y 1b muestran las zonas irrigadas en España y el porcentaje de superficie irrigada por comarcas, respectivamente.

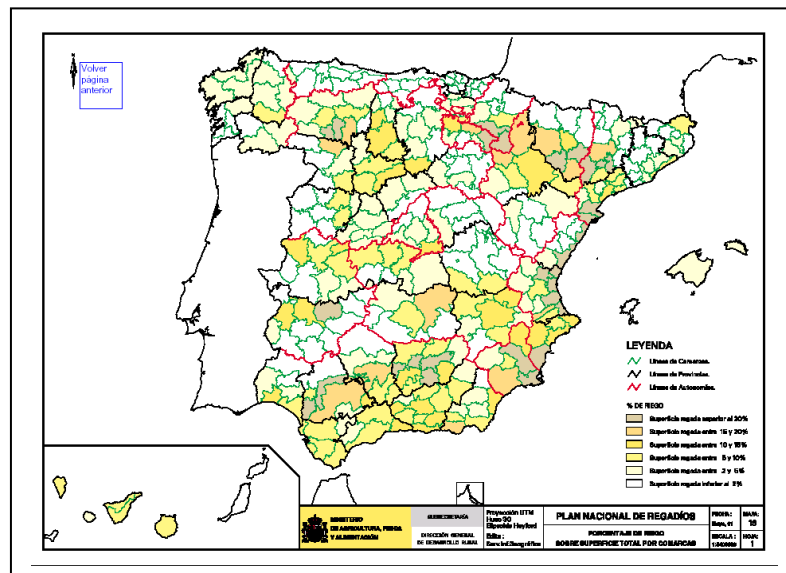
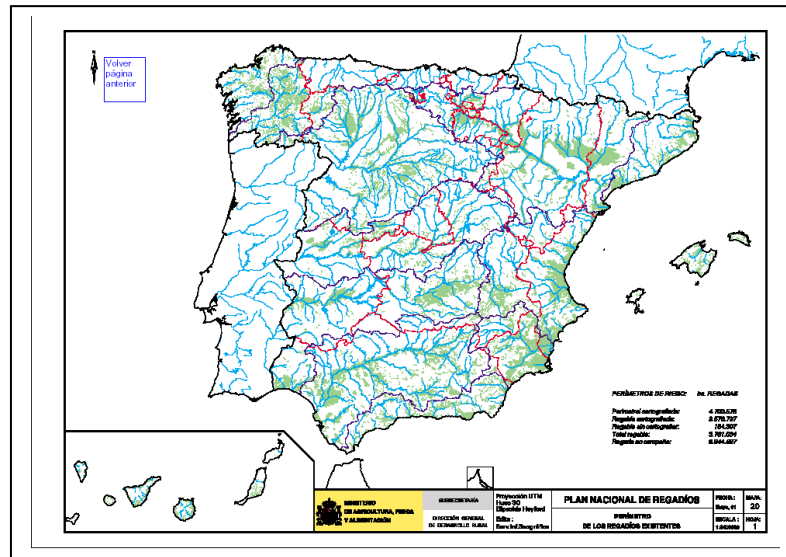


Fig.1.- Zonas irrigadas en España (arriba) y porcentaje de superficie irrigada por comarcas (abajo). (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

#### 4. Modelos numéricos

El tratamiento por medio de los modelos numéricos de predicción del tiempo y del clima de los procesos en la superficie terrestre es importante por: (i) redistribuir la energía radiante absorbida por el suelo en forma de calor latente y de calor sensible; (ii) determinar las condiciones de contorno inferior en las ecuaciones de la entalpía y de la humedad; (iii) determinar variables del tiempo tales como la temperatura y humedad relativa a 2 m y el viento a 10 m; y (iv) retroalimentar otros procesos físicos tales como la formación de nubes bajas y el disparo de procesos convectivos. Para una revisión de las parametrizaciones de superficie terrestre tanto en modelos de predicción del tiempo y del clima véanse los trabajos de Garratt (1993), Schmugge y André (Eds., 1991) y Viterbo (1996). La mayoría de los esquemas actualmente utilizados (Dickinson *et al.*, 1993; Sellers *et al.*, 1986; Chen *et al.*, 1996; Noilhan y Planton, 1989; Giard y Bazile, 2000; Schrodin y Heise, 2001; Best *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2003) imitan la fisiología de las plantas para regular la apertura y cierre de los estomas de las plantas durante el proceso de transpiración. Los estomas son sensibles a ciertas condiciones medioambientales (p.e., la radiación solar, la temperatura, la humedad atmosférica, el dióxido de carbono y el contenido de agua en la zona radicular) y dichas condiciones regulan su apertura y cierre.

Las ecuaciones de balance para el contenido de agua en el suelo básicamente utilizan como aportaciones positivas la precipitación y la fusión de la nieve y como aportaciones negativas la evapotranspiración y la escorrentía. La diferencia de ambas aportaciones suministra la variación del contenido de agua en el suelo. Los datos de precipitación y de evapotranspiración proceden de las propias predicciones de los modelos y por lo tanto suelen tener bastante error. La evapotranspiración depende crucialmente de la radiación neta de onda corta que alcanza el suelo y ésta a su vez depende críticamente de la nubosidad, que –junto con la precipitación– uno de los puntos más débiles de los modelos atmosféricos. Para paliar estos errores que acaba heredando la humedad del suelo, la mayoría de los modelos poseen un módulo de asimilación de humedad de suelo que básicamente corrige el contenido de agua en el suelo proporcionalmente a los errores de la predicción de temperatura y humedad a 2 metros (Mahfouf, 1991). Idealmente, si el modelo fuese perfecto la asimilación no precisaría corregir la humedad del suelo. Como esta situación dista mucho de la realidad, los modelos tienen que corregir mucho la humedad del suelo. Una de las fuentes de error más notorias es el hecho de que la mayoría de los modelos no tienen incluida la irrigación. De hecho, en la España meridional para muchos cultivos el principal aporte de agua procede de la irrigación, siendo la contribución de la precipitación bastante marginal.

#### 5. Tratamiento del regadío

Muy pocos modelos tienen incluida una simulación de los procesos de irrigación. De hecho ninguno de los modelos que se utilizan en el contexto europeo tanto para predicción a corto plazo (HIRLAM, ALADIN, COSMO, UK-UM) como a escala climática contemplan la irrigación. Sin embargo, entre los pocos intentos de simular la irrigación que ha habido se pueden mencionar los tres siguientes.

De Rosnay *et al.* (2003) proponen un esquema de regadío desarrollado para el modelo ORCHIDEE basado en tres componentes. Primero, la irrigación requerida,  $I_{net}$ , en

mm/día, que se calcula para cada punto de rejilla y a escala diaria. Segundo, la irrigación real que se calcula como el balance entre la demanda y el suministro de agua en el punto de rejilla. Los recursos disponibles para irrigación son el agua simulada por el esquema de direccionamiento (routing) del sistema fluvial y del acuífero. En cada punto de rejilla, la escorrentía y el drenaje constituyen el suministro del esquema de direccionamiento. El sistema incluye tres depósitos: la corriente fluvial y dos acuíferos asociados a dos escalas temporales. La topografía gobierna el transporte de agua a los puntos de rejilla vecinos (Vörösmarty *et al.*, 2000). Tercero, la irrigación real resulta de tomar el agua del sistema fluvial y de los acuíferos, añadiéndose a la humedad del suelo superficial, según la fracción irrigada de cada píxel. Este esquema requiere modelar los sistemas fluviales y los acuíferos que van suministrar el agua necesaria para el regadío. El impacto sobre la península India corresponde a un promedio de 9.5% de aumento del flujo de calor latente.

Yoruzu *et al.* (2005) proponen un esquema de regadío basado la creación de una base de datos de tipo de cosecha con su correspondiente calendario. Este esquema está implementado sobre el modelo de superficie SiBUC (Tanaka *et al.*, 1998), que a su vez es un desarrollo del modelo SiB (Sellers *et al.*, 1986) que incluye suelo urbano y fracción de agua. La base de datos se obtiene a partir de series temporales de NDVI. Se consideran 5 tipos de cosechas (trigo primaveral, trigo invernal, cereal, arroz y soja) y cinco etapas de crecimiento. El concepto básico de su esquema consiste en mantener la humedad del suelo dentro de intervalos apropiados que se definen para cada etapa del crecimiento y cada tipo de cosecha. Las reglas para activar el módulo de irrigación en el esquema de superficie requieren información relativa a los siguientes puntos: i) fecha de plantación; ii) fecha de recolección; iii) periodos de crecimiento; iv) mínima humedad del suelo para cada cultivo durante el periodo de crecimiento.

Haddeland *et al.* (2004) utilizan su esquema de irrigación sobre el modelo VIC (Liang *et al.*, 1994). El modelo llama a la irrigación cuando la humedad del suelo cae por debajo del nivel en que la transpiración está limitada, y continua irrigando hasta que la humedad del suelo llega a la capacidad de campo. Los cuadrados de rejilla contienen fracciones con y sin irrigación según la base de datos Kassel. El agua puede tomarse del río más próximo, de acuíferos subterráneos o bien suponerse libremente disponible. En simulaciones durante un periodo de 20 años para las cuencas de los ríos Mekong y Colorado han encontrado para los 3 meses pico de irrigación aumentos del flujo de calor latente de 63 Wm<sup>-2</sup> acompañados de reducciones en la temperatura de superficie de 2.1°C en puntos de rejilla aislados, si bien la temperatura promedio anual sólo ha decrecido en 0.04°C.

## 6. Discusión

La irrigación es un fenómeno relevante en muchas zonas del globo, en particular en la península Ibérica. En España, la superficie irrigada representa aproximadamente el 8% del territorio y en promedio aporta 500 mm/año a las zonas irrigadas. Esta contribución es comparable, cuando no superior, a la aportación de la precipitación en muchas zonas. Además, esta aportación se suele circunscribir al periodo de crecimiento de las plantas que solo suele abarcar los meses más cálidos. Las simulaciones numéricas tanto para la predicción del tiempo como para las predicciones a largo plazo (estacionales, climáticas) deben por tanto incluir estas aportaciones.

Los modelos de predicción a corto plazo (p.e., HIRLAM, ALADIN,...) que poseen un módulo de asimilación para variables del suelo que incluye la humedad del suelo pueden compensar el efecto de la falta de irrigación añadiendo agua sistemáticamente durante la fase de asimilación. Este efecto fue notado durante las simulaciones realizadas en el marco del proyecto ELDAS (Parodi et al., 2004) con el modelo HIRLAM durante un periodo que abarcaba desde junio a octubre de 2000. La figura 2 representa los incrementos medios del análisis de humedad del suelo (análisis menos campo previo) para el mes de octubre de 2000. Los colores amarillos y ocres representan aportación de agua por la asimilación. En general se observa que la asimilación necesita aportar agua en gran parte de la zona mediterránea, en particular en el sur y en la costa mediterránea española. Otros meses el efecto no está tan circunscrito a esta región y abarca zonas más amplias de Europa. Este efecto es común para muchos modelos (p.e., ECMWF) que precisan aportación extra de agua por parte de la asimilación durante los meses veraniegos. El efecto contrario se da en invierno. La asimilación, pues, tiende a amortiguar el ciclo anual de humedad del suelo del modelo. Por supuesto, no solamente la ausencia de irrigación es responsable de este comportamiento, puesto que también aparece en zonas claramente no irrigadas. A este efecto contribuye posiblemente también el hecho de que el espesor de suelo que interactúa con la atmósfera puede ser inferior al debido. La inclusión de un módulo de irrigación paliaría los excesivos incrementos de humedad en la península Ibérica.

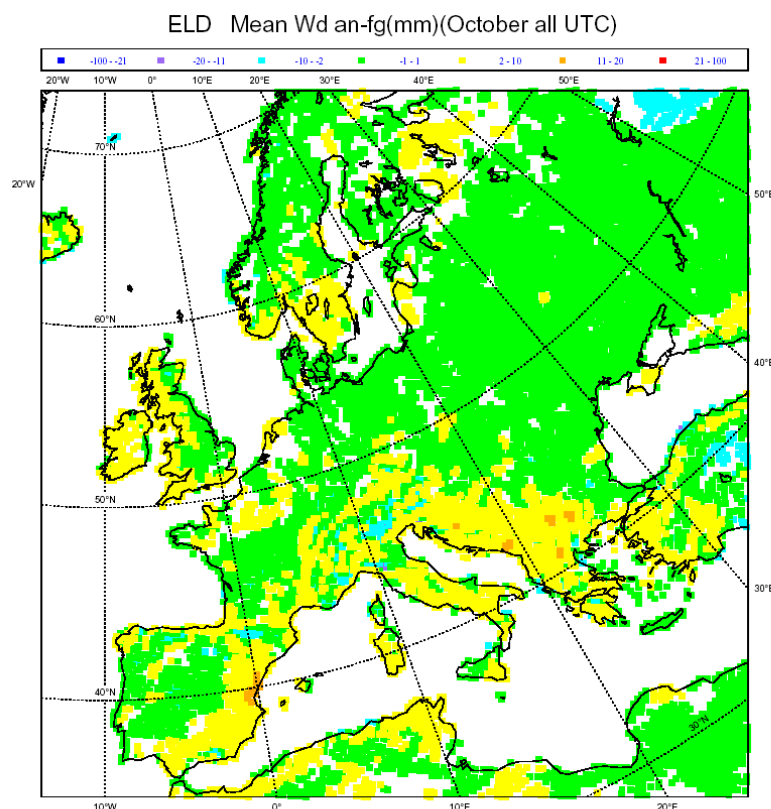


Fig. 2. Incremento medio mensual (octubre de 2000) del análisis de humedad del suelo. Las unidades son mm. Los colores amarillos y ocres representan contribuciones positivas del análisis, mientras que los colores azules representan contribuciones negativas. El color verde representa contribución próxima a cero.

Como se ha mencionado más arriba, los módulos de irrigación están muy poco incluidos en los esquemas de superficie estandar y sin embargo su efecto puede llegar a ser cuantitativamente muy importante sobre grandes zonas del planeta y en particular sobre la península Ibérica. Simulaciones con otros esquemas (p.e., Haddeland *et al.* 2004) muestran que una irrigación de 500 mm/año, puede aumentar el flujo de calor latente en unos 20 W/m<sup>2</sup> y como consecuencia la temperatura a 2m puede disminuir entre 1-2 K. Este impacto se notaría en las predicciones a plazos mensual y/o estacional, ya que como se ha mencionado más arriba las integraciones a corto plazo se benefician de la asimilación de la humedad del suelo que es capaz de compensar estas carencias de las simulaciones.

De lo anteriormente expuesto se deduce que se puede incluir en HIRLAM o en cualquier otro modelo operativo de predicción del tiempo un esquema relativamente simple de irrigación libre (sin transporte fluvial y sin depósitos de agua subterránea) que asigne a cada punto de rejilla un tipo de cultivo (entre 5 o 6 cultivos tipo) y la humedad del suelo mínima para cada cultivo y cada fase el crecimiento. Esta humedad se conseguiría con un término de precipitación adicional que actuaría para mantener la humedad requerida. En definitiva se trataría de suministrar en forma de regadío una contribución de agua que sea compatible con la existencia del cultivo que se ha asignado a cada punto de rejilla. El sistema se podría calibrar adicionalmente estimando las necesidades de agua de cada punto de rejilla durante el periodo de crecimiento y comparando con los aportes supuestamente conocidos correspondientes al dato real de irrigación. Sería por tanto conveniente generar un campo de salida que acumulase la contribución del regadío al igual que se hace con la precipitación acumulada durante la integración. Las acumulaciones anuales, estacionales o mensuales de dicho campo habría que compararlas con los datos de regadío distribuidos geográficamente. Como el regadío sólo corresponde a una fracción de un cuadrado de rejilla, sería también muy conveniente añadir una fracción adicional para describir la superficie terrestre irrigada separadamente de la no irrigada.

## 7. Referencias

- Anonymous. 2001. *Global Land Cover Characteristics Data Base*. [http://edcdaac.usgs.gov/glcc/globdoc2\\_0.html](http://edcdaac.usgs.gov/glcc/globdoc2_0.html).
- Barnston, A.G. and Schickedanz, P.T. 1984. The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 865-888.
- Best, M., Bornemann, F.J., Chalcraft, B.V. and Wilson, C.A. 2000. Mesoscale model upgrade- Introduction of the land surface tile scheme (MOSES2). *Forecasting Research Technical Report No. 341*, UK Met. Office, Bracknell RG122SZ United Kingdom.
- Chen, F. and co-authors. 1996. Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268.
- De Rosnay, P., Polcher, J., Laval, K. and Sabre M. 2003. Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (19), doi:10.1029/2003GL018024, 2003.
- Dickinson, R.E. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS). Version 1e as coupled to the NCAR community climate model. *NCAR Technical Note/NCAR TN-387+STR*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Döll, P. and Siebert, S. 2002. Global modelling of irrigation water requirements. *Water Resour. Res.*, **38**(4), 8.1-8.10
- Doll, P.; and S. Siebert. 1999. *A digital global map of irrigated areas*. Report A9901. Germany: Center for Environmental Systems Research, University of Kassel.



- Droogers, P. 2002. *Global irrigated area mapping: Overview and recommendations*. Working Paper 36. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2001. *FAOSTAT agriculture data*. <http://apps.fao.org/>.
- Garratt, J.R. 1993. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary treatment – A review. *J. Climate*, **6**, 419-449.
- Giard, D. and Bazile, E. 2000. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 997-1015.
- Haddeland, I., Lettenmaier D.P., Skaugen, T., 2004, Effect of irrigation on the water and the energy balances of the Colorado and Mekong river basins, *Journal of Hydrology* (in review)
- Schrodin, R. and Heise, E. 2001. The multi-layer version of the DWD soil model TERRA\_LM. COSMO Technical Report No.2, DWD, 63004 Offenbach, Germany. [Available from <http://www.cosmo.model.org>].
- Hammer, R.M. 1970. Cloud development and distribution around Khartoum. *Weather*, **25**, 411-414.
- Lohar, D. and Pal, B. 1995. The Effect of Irrigation on Premonsoon Season Precipitation over South West Bengal, India. *J. Climate*, **8**, 2567-2570.
- Mahfouf, J.-F. 1991. Analysis of soil moisture from near surface parameters: a feasibility study. *J. Appl. Meteorol.*, **30**, 1534-1547.
- Moore, N. and Rojstaczer, S. 2001. Irrigation-Induced Rainfall and the Great Plains. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1297-1309.
- Noilhan, J. and Planton, S. 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Parodi J.A., Navascués B. And Rodríguez E. (2005). Significance of ELDAS soil moisture products for NWP. *Proceedings of the ECMWF/ELDAS Workshop on Land Surface Assimilation*. [Available at <http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/17998/>].
- Rodríguez, E., Navascués, B., Ayuso, J.J. and Järvenoja, S. 2003. Análisis of surface variables and parameterization of surface processes in HIRLAM. Part I: Approach and verification by parallel runs. HIRLAM Technical Report No. 58, Norrköping, Sweden. [Available from <http://hirlam.knmi.nl>].
- Schmugge, T.J. and André, J.-C. (Eds.) 1991. *Land Surface Evaporation. Measurement and Parameterization*. Springer-Verlag, New York, U.S.A., 424 pp.
- Shiklomanov, I.A. 1997. Assessment of water resources and availability in the world. In *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world*. Stockholm, Stockholm Environment Institute. 88 pp.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A. 1986. A simple biosphere model (Sib) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- Siebert, S., P.D. J.H. 2002. Global map of irrigated areas version 2.1, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2002.
- Tanaka, K., N.E. and I.S., 1998. Land-surface Parameterization in the Lake Biwa Project, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 42, pp.79-84 (in Japanese)
- Viterbo, P. 1996. The representation of surface processes in general circulation models. Thesis submitted for the degree of Doutor em Física of the University of Lisbon. ECMWF. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, UK.].
- Vörösmarty, C.J., B.M. Fekete, M. Meybeck, and R.B. Lammers. 2000. Global system of rivers: its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages. *Global Biogeochem. Cycles*, **14**, 599-621.
- Yorozu, K., Tanaka, K. and Ikebuchi, S. 2005. Creating a global 1-degree dataset of crop type and cropping calendar through the time series analysis of NDVI for GSWP2 simulation considering irrigation effect. 19<sup>th</sup> AMS Conference on Hydrology. 9-13 January 2005. San Diego, California, USA.